Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 2. С. 170–178. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 2, pp. 170–178. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.792.8 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-170-178

К вопросу обеспечения герметичности соединений на основе технологического индуцирования*

Г. А. Пилюшина[1], П. Г. Пыриков[2], Е. А. Памфилов[3], В. В. Капустин[4]**
[1,2,3,4]Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация

On ensuring joint tightness on the basis of technological induction***

G. A. Pilyushina[1], P. G. Pyrikov[2], E. A. Pamfilov[3], V. V. Kapustin[4]**
[1,2,3,4]Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

Введение. Статья посвящена некоторым теоретическим и технологическим аспектам обеспечения герметичности соединений на основе магнитострикции, а также поляризации герметизируемой среды в состоянии внешнего индуцирования. Исследовано управление шероховатостью поверхностей стыкуемых деталей для повышения плотности стыка при их индуцировании внешним магнитным полем. Рассмотрено создание электромагнитных барьеров для перемещения молекул герметизируемой среды через герметизатор. Цель работы — обоснование технологических условий обеспечения герметичности подвижных соединений в описанных выше случаях.
Материалы и методы. Условия обеспечения плотности стыка показаны как результат решения контактной задачи и как фактор, определяемый положениями молекулярно-механической теории трения. Приняты геометрические, эксплуатационные и трибологические условия герметичности соединений. Демпфирующие свойства неподвижного фрикционного контакта определены молекулярной составляющей. Представлено теоретическое и расчетное обоснование факторов, влияющих на плотность стыка. В качестве целевых результатов технологической подготовки поверхностей деталей соединения указаны уменьшение глубины сглаживания, уменьшение отношения шагов поперечной и продольной шероховатости и увеличение площади контакта. Потеря герметичности определена как специфический трансфер молекул. Они переносятся в зону стыкуемых поверхностей или свободно перемещаются через герметизатор на стадиях сорбционного поглощения, диффузии и десорбции. Преобладание какой-либо стадии происходит при изменении энтропии и обусловлено температурой и давлением. Визуализированы схемы герметизации соединений в управляемом магнитном поле, зависимости магнитострикции и магнитострикционных напряжений от напряженности магнитного поля.
Результаты исследования. Экспериментально исследована устойчивость герметизаторов в легколетучих и газовых средах при их поляризации и намагничивании во внешнем

Introduction. Some theoretical and engineering aspects of sealing joints through magnetostriction, as well as the polarization of the sealed medium under the external induction are considered. Control of surface roughness of joined parts to increase the joint density when induced by an external magnetic field is studied. The creation of electromagnetic barriers for the migration of molecules of the sealed medium through a sealer is considered. The work objective is to validate the technological conditions for sealing movable joints in the cases described above.
Materials and Methods. The conditions for ensuring the joint density are shown as a result of the contact problem solution and as a factor determined by the molecular-mechanical friction theory. Geometric, operational and tribological conditions of joint tightness are accepted. Damping properties of the fixed friction contact are determined by the molecular component. The theoretical and calculated analysis of the factors affecting the joint density is presented. Decrease in the smoothing depth, reduction of the ratio of transverse and longitudinal roughness steps, and increase in the contact area are indicated as the target results of the process preparation of the surfaces of the joint parts. Loss of tightness is defined as a specific transfer of molecules. They are transferred to the area of the joined surfaces or migrate freely through the sealer at the stages of sorption, diffusion and desorption. The predominance of any stage occurs when the entropy changes, and it is due to temperature and pressure. The schemes of sealing joints in the controlled magnetic field and of the dependence of magnetostriction and magnetostrictive stresses on the magnetic field strength are visualized.
Research Results. The stability of sealers in highly volatile and gaseous media during their polarization and magnetization in an external field is experimentally investigated. In the former case, the magnetic induction vector was first oriented perpen-

* Работа выполнена по договору 9.10677.2018/11.12.
** E-mail: gal-pi2009@yandex.ru, pyrikovpg@mail.ru, epamfilov@yandex.ru, vovakapustin1990@mail.ru
*** The research is done within the frame of Contract No. 9.10677.2018/11.12.



поле. В первом случае сначала вектор магнитной индукции ориентировался перпендикулярно продольной оси соединения. Установлено падение величины магнитного потока при работе соединения под нагрузкой в течение 268 часов. Общая наработка соединения составила 1070 часов. Если же вектор магнитной индукции ориентировался продольно оси вала, наработка до момента коррекции величины напряженности поля составила 87 часов. В газовой среде продолжительность работы соединения до момента корректировки напряженности составила 187 часов при общей наработке 935 часов.
Обсуждение и заключения. Проникающая способность герметизируемых сред уменьшается в ряду «газ — пар — жидкость». Она зависит от температуры на контакте соединения. Разгерметизацию можно отследить по изменениям магнитного потока, определяемого собственной магнитной проницаемостью молекул герметизируемой среды при их проникновении на поверхность стыка. Чтобы повысить герметичность, необходимо подавить активность молекул. Для этого применяются ионизация и индуцирование в постоянном и переменном магнитном поле напряженностью <60 кА/м.

dicular to the longitudinal axis of the joint. A drop in the magnitude of the magnetic flux was observed when the compound was under the on-load operation for 268 hours. The total operating time of the joint was 1070 hours. If the magnetic induction vector was oriented longitudinally to the shaft axis, the operating time to the correction of the field strength was 87 hours. In the gas environment, the operating time of the connection to the adjustment of the tension was 187 hours with a total operating time of 935 hours.
Discussion and Conclusions. The penetrating ability of pressurized media decreases in the “gas – vapor – liquid” series. It depends on the temperature at the joint contact. Depressurization can be traced through changes in the magnetic flux determined by the intrinsic magnetic permeability of the molecules of the sealed medium as they penetrate the interface surface.
To increase tightness, it is required to suppress the activity of molecules. For this purpose, ionization and induction in the constant and alternating magnetic field with the intensity of <60 kA/m are used.

Ключевые слова: герметичность, соединение, детали машин, индуцирование, плотность, магнитное поле, кристаллографическое упорядочение, контактная жесткость, анизотропные эффекты.

Keywords: tightness, joint, machine parts, induction, density,magnetic field, crystallographic ordering, contact rigidity, anisotropic effects.

Образец для цитирования: К вопросу обеспечения герметичности соединений на основе технологического индуцирования / Г. А. Пилюшина [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 170−178. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-170-178

For citation: G.A. Pilyushina, et al. On ensuring joint tightness on the basis of technological induction. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 170−178. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-170-178

Введение. Теоретическая основа герметологии изложена в трудах Г. А. Голубева, А. В. Чичинадзе, В. П. Тихомирова, Л. А. Кондакова, Г. В. Макарова, Х. Х. Вахтера, Э. Майера, Р. Х. Уоринга и др. Известно, что герметичность обеспечивается главным образом двумя факторами:

— стабильностью технологической плотности стыкуемых шероховатых поверхностей деталей герметизатора;

— стабильностью свойств материала герметизатора и герметизируемой среды, исключающей проникновение и перемещение через уплотнитель ее молекул за пределы стыка.

Условия обеспечения плотности стыка обосновываются с помощью решения контактной задачи и в существенной степени определяются положениями молекулярно-механической теории трения [1, 2, 3]. Отмеченный подход остается одним из основополагающих в инженерии герметичности.

Проникновение герметизируемых сред (жидкостей, газов) через герметизатор описывается физической моделью С. Слихтера, И. Козени, Т. Кармана и Д. К. Коллерова (для пористых полимеров). Из ее анализа следует, что объемный поток среды через уплотнение определяется длиной свободно проходимого пути молекул [4, 5, 6] и зависит от:

— высоты микронеровностей R_{max} твердой поверхности,

— плотности стыка P,

— относительного сближения ε,

— геометрических размеров уплотнения.

Характерно, что процесс фреттинга инициируют граничные структуры, в качестве которых выступают различные полимерные уплотнители, жидкости и пленки на поверхностях стыка при амплитудах контактных вибраций менее 0,05 мм. Указанные среды могут выступать катализаторами, что приводит к снижению технологически обеспеченной проектной величины удельного давления на уплотнитель и увеличивает утечки.

Амплитуду и частоту относительных смещений деталей соединения можно снизить за счет управления плотностью стыка, например, при увеличении номинального давления на уплотнитель. Исследования, проведенные на полимерах в узлах трения [7], позволяют отметить, что плотность стыка и контактная жесткость в значительной степени зависят от усилия сжатия поверхностей и от их межмолекулярной активации:

$$F_{тр} = aS + bP_y ,$$

где $F_{тр}$ — сила трения; a — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения; S — фактическая площадь контакта; b — коэффициент механической составляющей силы трения; P_y — сила сжатия поверхностей.

Из этого следует, что молекулярная составляющая aS пропорциональна:

— площади фактического контакта,

— интенсивности взаимной адгезии контактирующих материалов.

Оба названных показателя можно увеличить за счет пластического насыщения по плоскости сопряжения, в том числе при приработке деталей соединения. Аналогичные условия могут создаваться на основе магнитострикционных эффектов, в бóльшей степени выраженных для текстурированных материалов. Такие условия применимы и в случаях, когда повторные нагружения деталей соединения затруднены или не предусмотрены нормами эксплуатации.

Уменьшение проникающей способности герметизируемых сред прогнозируется при формировании подвижной сферолитной структуры герметизатора или его модифицирования порозаполнением низкомодульными материалами [8]. Однако требуют особого рассмотрения ситуации, складывающиеся при существенно отрицательных температурах и растрескивании полимерного герметизатора. В этих случаях отмечаются различия в температурных коэффициентах линейного расширения с металлами, поэтому представляет интерес возможность управлять проникающей способностью молекул герметизируемой среды путем создания для них электромагнитных барьеров.

Итак, цель настоящей работы — изучение технологических условий обеспечения герметичности соединений на основе индукционных эффектов, создаваемых в материалах деталей соединения и в герметизируемой среде.

Материалы и методы. Условия герметичности соединений следуют из выводов задачи Ляме, в которых граничными факторами выступают:

— геометрические (например, длина l контакта поверхностей и диаметр d деталей сопряжения);

— эксплуатационные (продольная осевая сила $R_{ос}$ или крутящий момент $M_{кр}$, стремящиеся сдвинуть одну деталь относительно другой);

— трибологические (коэффициент трения f), определяющие момент распрессовки или проворачивания.

Фрикционное стопорение обеспечивается при минимизации амплитуды относительных смещений поверхностей, при контактных напряжениях, не превышающих область демпфирующей способности материалов [7].

Демпфирующие свойства неподвижного фрикционного контакта определены, в частности, молекулярной составляющей. Причем сопряжения с текстурированной (анизотропной) структурой в направлении обеспечения высокой демпфирующей способности допускают более высокое значение критических вибрационных нагрузок в широком диапазоне частот [8].

Кроме того, при внешнем индуцировании изменения параметра шероховатости R_a вследствие магнитострикционного эффекта способны повлиять на плотность стыка. Это объясняется сопоставимостью величин магнитострикции и размеров блоков структурных составляющих (около 10^{-4}–10^{-5} м). Причем технологическое текстурирование по кристаллографическим направлениям с выраженными максимумами упругих или пластических свойств материалов позволяет при однонаправленном положении вектора магнитной индукции добиться максимального магнитострикционного эффекта. Это приводит к тому, что в разборных соединениях с натягом величина номинального давления возрастает, т. к. часть напряжений, расходуемых на податливость деталей, компенсируется магнитострикционными напряжениями в пределах упругих свойств. В неразборных, наоборот, часть напряжений может расходоваться на пластическое насыщение контакта. По этой же причине фактический

натяг оказывается больше расчетного.

Коэффициент плотности стыка P при магнитострикционном эффекте:

$$P = (V_{1m(hkl)} + V_{2m(hkl)})k_{(hkl)} / V_{общ}. \quad (1)$$

Здесь $V_{1м(hkl)}$ — объем материала шероховатого слоя с текстурой hkl; $V_{2м(hkl)}$ — объем материала несжимаемого уплотнителя, выдавленного в зазоры; k — коэффициент магнитострикции; $V_{общ}$ — общий объем шероховатого слоя.

Известно, что наличие волн приводит к уменьшению опорной площади контакта в 5–10 раз [9]. Следовательно, решение контактной задачи в аспекте обеспечения герметичности соединения требует учета волнистости поверхностей.

Высотные и шаговые параметры шероховатости взаимосвязаны, поэтому технологическая подготовка поверхностей деталей соединения должна быть нацелена на следующие результаты:
— уменьшение глубины сглаживания R_p;
— уменьшение отношения шагов поперечной и продольной шероховатости;
— увеличение площади контакта и отношения R_p / R_a.

Прямой зависимости между значением допуска и высотой неровностей, как правило, нет, однако следует заметить, что впадины на профилограмме поверхности оказываются резервуарами, в которых скапливаются побочные продукты, инициирующие поверхностное разупрочнение.

При обеспечении плотности стыка за счет натяга податливость S_N соединения представляется в виде:

$$S_N = x(t) + (\xi_{(hkl)}(B)k^{`}) / N^*, \quad (2)$$

где $x(t)$ — нормальное контактное смещение в функции времени; $\xi_{(hkl)}(B)$ — тензор магнитострикции при регламентированном кристаллографическом упорядочении, учитывающий пластические деформации в покрытии и изменяющийся с магнитной индукцией; $k^{`}$ — коэффициент кристаллографического упорядочения; N^* — динамическая нагрузка.

При работе соединений в условиях гидростатического давления герметизируемой среды (жидкости или газа) потеря герметичности выражается в определенной форме трансфера молекул. Они переносятся в зону стыкуемых поверхностей или свободно перемещаются через герметизатор на стадиях сорбционного поглощения, диффузии (с выравниванием концентрации среды в герметизаторе) и десорбции. Преобладание какой-либо стадии происходит при изменении энтропии и обусловлено температурой и давлением.

Простейшим случаем фазового переноса в уплотнениях является течение вязкой несжимаемой жидкости в пористой среде. При этом определение величины утечки следует из закона Дарси. Однако в данном случае не учитывается, что уплотнительный стык, в отличие от объемного пористого тела, образован в результате контакта двух поверхностей. Поэтому с ростом нагрузки, а также с приработкой поверхностей отдельные пятна контакта могут образовывать изолированные объемы (эффективные каналы). Их число с ростом нагрузки уменьшается до момента образования гидродинамической пленки по периметру уплотнения [10–11].

Таким образом, принимая во внимание проводящую способность большинства герметизируемых сред, целесообразно исследовать обеспечение герметичности с позиций поляризации и внешнего индуцирования.

Согласно [12], при прохождении среды через источник электрического тока или ионизатор молекулы получают заряд величины q. Если заряженная частица, имеющая начальную скорость v, движется в однородном магнитном поле вдоль линий магнитной индукции B внешнего поля, то угол α между векторами v и B равен нулю. Магнитное поле на частицу не действует (сила Лоренца также равна нулю), и она движется равномерно и прямолинейно.

Если же заряженная частица движется со скоростью v в магнитном поле перпендикулярно вектору B, то сила Лоренца $F = q[vB]$ оказывается постоянной по модулю и перпендикулярной к траектории частицы, что исключает ее перемещение (рис. 1, *а*).

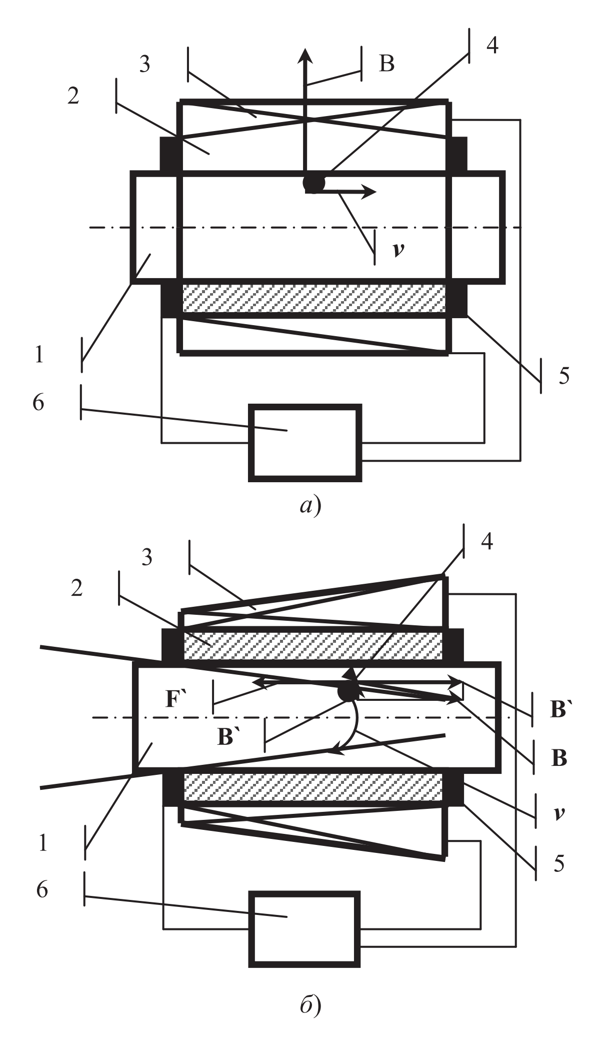


Рис. 1. Схемы герметизации соединений в управляемом магнитном поле: в однородном поле торообразного индуктора (*а*); в неоднородном поле соленоида (*б*); 1 — вал; 2 — втулка; 3 — магнит; 4 — заряженная частица среды; 5 — источник электрического тока (или ионизатор); 6 — блок автоматического управления соленоидом с генератором напряжения); *v* — орбита положительно заряженной частицы среды

Предполагая направление движения среды, зная ее электрический потенциал, вязкость, плотность, проникающую способность и изменяя напряженность поля и положение вектора магнитной индукции, возможно обеспечить силу Лоренца в величинах, достаточных для полного подавления движения. Тем самым реализуется эффект, реактивный гидростатическому давлению.

Аналогично в неоднородном магнитном поле составляющая магнитной индукции $B`$ создает силу F', выталкивающую частицу в область слабого поля (см. рис. 1, *б*). Изначально частица движется по радиусу постоянной величины со скоростью v. Однако собственное магнитное поле противодействует внешне наведенному, и этим объясняется крайняя неустойчивость его состояния. В результате частица выталкивается в область поля с пониженной напряженностью.

Эффект герметизации основан на создании магнитным полем реактивного отталкивания предварительно заряженных молекул среды, проникающих на поверхность стыка. Причем степень герметизации зависит от магнитной индукции, величина которой устанавливается через силу тока с учетом относительной магнитной проницаемости и формфактора индуктора.

Можно предположить, что условия вакуумизации стыка создаются при сближении поверхностей деталей сопряжения до проявления молекулярного (адгезионного) взаимодействия. При этом магнитная проницаемость материалов деталей соединения представляется отношением магнитных потоков в материале Ф и в вакууме $Ф_0$ ($\mu = Ф/Ф_0$). При допущении $Ф = Ф_0$ за единицу может быть принята магнитная проницаемость вакуума ($\mu = 1$).

В среде с неизменной магнитной проницаемостью индукция магнитного поля пропорциональна его напряженности. Следовательно, магнитный поток от внешнего поля, изначально определенный для вакуума, зависит от магнитной проницаемости среды. Ее присутствие на стыке соединения вследствие собственной магнитной проницаемости либо увеличивает магнитный поток (в парамагнитных средах), либо уменьшает его (в

диамагнитных).

Таким образом, по изменению магнитного потока и, соответственно, магнитной индукции можно оценить и технологически скорректировать эффективность работы герметизатора в состоянии индуцирования.

Результаты исследования. Описанные ниже кристаллографические направления могут быть приняты в качестве регламентированных при технологическом текстурировании деталей.

1. Для разъемных соединений без полимерного герметизатора: [110] (для структур с объемноцентрированной кубической (ОЦК) решеткой), [111] (с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой решеткой), [1000] (с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой).

2. Для неразъемных соединений и соединений с герметизатором: [100]–[111] (с ОЦК-решеткой), [100]–[110] (с ГЦК-решеткой), [0001]–[2110] (с ГПУ-решеткой).

При установлении вектора магнитной индукции в указанных направлениях магнитострикция λ в кристаллах оказывается полеориентированной. Это связано с тем, что ее величина нелинейна с напряженностью поля и определяется преимущественно положением оси легчайшего намагничивания [13, 14].

При отсутствии предварительного текстурирования среднее изменение шероховатости для структур с решетками кубической сингонии представляется в виде:

$$0 \le \Delta\overline{R_a} < \left(\frac{2}{5}\lambda_{100} + \frac{3}{5}\lambda_{111}\right)d^{`}, \qquad (3)$$

где λ_{100}, λ_{111} — константы магнитострикции вдоль кристаллографических направлений [100] и [111]; $d^{`}$ — средний размер дисперсных структурных составляющих.

В случае текстурирования в направлениях [100] или [111] при ориентации поля по нормали к поверхности (рис. 2) изменения шероховатости (R_a) составят:

$$0 \le \Delta\overline{R_a} < \lambda_{100}\overline{d} / k, \qquad (4)$$

$$0 \le \Delta\overline{R_a} < \frac{3}{4}\lambda_{111}\overline{d} / k, \qquad (5)$$

где k — коэффициент потерь на размагничивание.

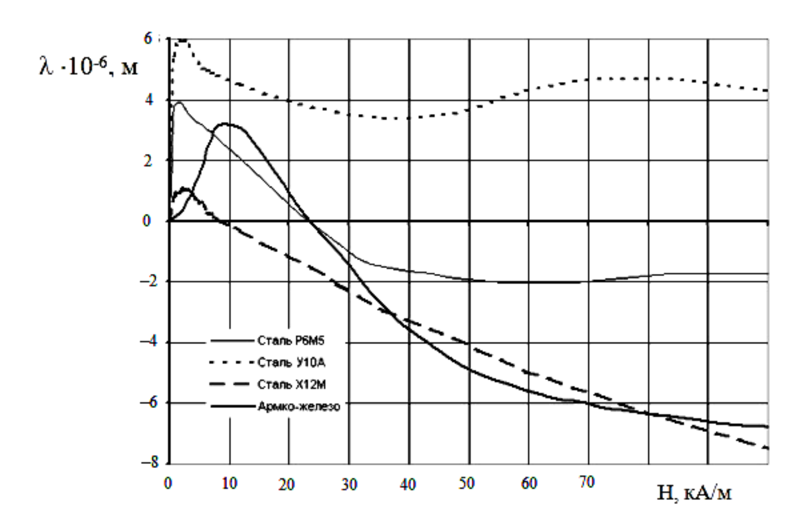


Рис. 2. Зависимость величины магнитострикции λ от напряженности H магнитного поля

Испытаны затворы с седлом из стали Х12М с текстурированным в направлении [111] покрытием ферритом кобальта $CoFe_2O_4$ толщиной 20×10^{-5} м (R_{max} 2,4 мкм, $r_1 = 52\times10^{-3}$ и $r_2 = 50\times10^{-3}$ м) и клапаном из латуни на величину потока утечки Q, мкПа·м^3/с гелия ($T = 77$ К). Установлено, что при намагничивании соединения в поле 60 кА/м эта величина составляет 780–10240. Число циклов срабатывания затвора — 200–5000 соответственно. При аналогичных условиях испытаний пары «седло — клапан» в отсутствие магнитного поля и предварительного текстурирования седел величина Q составила 960–15340 мкПа·м^3/с соответственно.

При увеличении напряженности магнитного поля не установлены существенные изменения работоспособности соединения. По-видимому, это связано с тем, что эффективные магнитострикционные напряжения образуются в полях <40 кА/м (рис. 3). Данный вывод согласуется с результатами исследования магнитострикции.

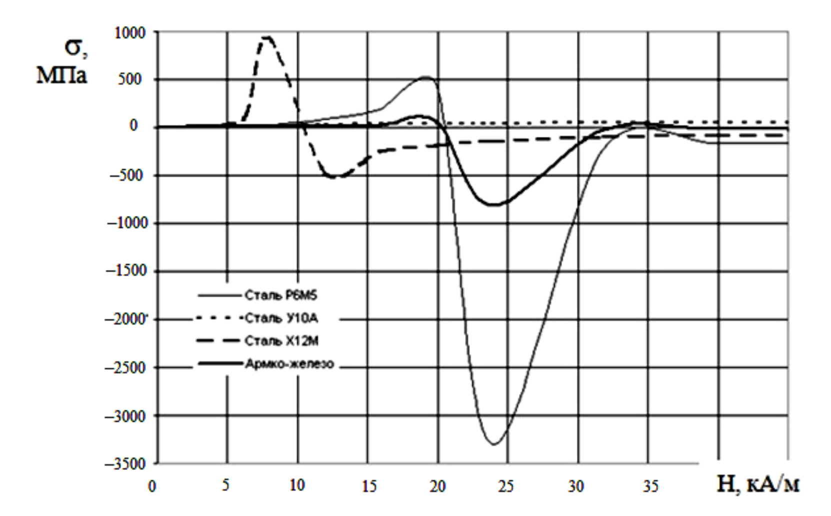


Рис. 3. Зависимость величины магнитострикционных напряжений σ от напряженности *H* магнитного поля

Изменение свойств герметизируемой среды, материалов герметизатора и температуры сказывается на проникающей способности и герметичности в целом. Проникающая способность сред уменьшается в ряду «газ — пар — жидкость». С учетом этого исследовалась работоспособность герметизаторов в легколетучих и газовых средах при их поляризации и намагничивании во внешнем поле.

На торце неподвижного разъемного соединения вала с втулкой из меди крепился источник электрического тока, один из полюсов которого фиксировался к торцам втулки. При этом второй полюс имел минимальный зазор с образующей вала.

Соединение помещалось между полюсами тороидального электромагнита, подключенного к блоку автоматического управления с генератором напряжения, вольтметром и веберметром. Вектор магнитной индукции ориентировался перпендикулярно продольной оси соединения.

Соединение устанавливалось в камере, заполненной диамагнитным бензолом. В ней создавалось давление 30–35 кПа. Втулку жестко фиксировали, после чего включали источник электрического тока и индуктор и устанавливали напряженность магнитного поля 60 кА/м. Вал механически нагружали в радиальном и осевом направлении относительно втулки по симметричному знакопеременному циклу при величине нагрузки 1,5 Н с частотой 50 Гц. Испытания проводили до момента снижения магнитного потока, регистрируемого по показаниям веберметра. Этот момент характеризовал нарушение герметичности, выражающееся в проникновении бензола на поверхность стыка. Блок автоматического управления индуктором корректировал напряжение в обмотке тороида, в связи с чем устанавливалась напряженность магнитного поля, равная изначально заданной.

Установлено падение величины магнитного потока при работе соединения под нагрузкой в течение 268 часов. Общая наработка соединения составила 1070 часов. Критерием завершения испытаний было сокращение интервала наработки до момента коррекции величины напряженности магнитного поля. Она должна превышать 60 кА/м. Это обусловлено необходимостью увеличения продолжительности наработки до значения, соответствующего предшествующим циклам.

При ориентировании вектора магнитной индукции продольно оси вала при аналогичных режимах испытания наработка до момента коррекции величины напряженности поля составила 87 часов.

Имитирование условий эксплуатации соединения в среде газа проводили аналогичным образом. На вал устанавливали ионизатор, который крепили к торцам втулки. Соединение помещали в соленоидальный индуктор, плотность витков которого увеличивалась от торца втулки. Благодаря этому создавалось неоднородное магнитное поле, напряженность которого увеличивалась от торца соленоида.

Соединение помещали в камеру под давлением 30–35 кПа с парамагнитным азотом, после чего включали ионизатор и индуктор. Вал нагружался на режимах, описанных выше, с периодическим фиксированием магнитного потока. Момент изменения его начального значения характеризовал нарушение герметичности и проникновение азота на поверхность стыка. При этом блок автоматического управления индуктором обеспечивал снижение напряжения в обмотке соленоида до величины, соответствующей напряженности магнитного поля 60 кА/м.

Продолжительность работы соединения до момента корректировки величины *H* составила 187 часов при общей наработке 935 часов. Большая продолжительность испытаний вызывала необходимость коррекции напряженности магнитного поля при интервале наработки менее 187 часов.

Обсуждение и заключения. Уменьшение утечек через герметизирующие устройства обеспечивается за счет управления плотностью стыка (удельным давлением p_a) при снижении амплитуды и частоты относительных смещений деталей соединения. Последнее достигается за счет увеличения площади фактического контакта и интенсивности взаимной адгезии контактирующих материалов, в частности благодаря магнитострикционным эффектам. При этом уровень магнитострикционных напряжений не должен приводить к пластическим деформациям уплотнителя (т. е. $p_a \approx 1{,}1\sigma_m$) и может быть обеспечен в полях до 40–50 кА/м. При изменении вследствие магнитострикции комплексного параметра шероховатости Δ отмечается увеличение площади опорной поверхности контакта, преимущественно за счет того материала, у которого модуль упругости оказывается меньше, а магнитострикция выше.

Влияние увеличивающейся при магнитострикции площади опорной поверхности контакта на герметичность возрастает с уменьшением глубины сглаживания R_p и отношения шагов поперечной и продольной шероховатости. В результате за счет компенсаторного эффекта со стороны магнитострикционных напряжений растет номинальное давление в соединениях. Магнитострикцию стимулирует кристаллографическая магнитная анизотропия, в частности при технологическом текстурировании.

В ряду «газ — пар — жидкость» уменьшается проникающая способность герметизируемых сред. Она оказывается зависимой от температуры на контакте соединения. Разгерметизация диагностируется по изменениям магнитного потока под влиянием собственной магнитной проницаемости молекул герметизируемой среды при их проникновении на поверхность стыка. Можно повысить герметичность, если подавить активность молекул. Для этого применяются ионизация и индуцирование в постоянном и переменном магнитном поле напряженностью <60 кА/м.

Библиографический список

1. Галин, Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. — Москва : Физматгиз, 1980. — 303 с.

2. Демкин, М. Н. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей / М. Н. Демкин, В. В. Измайлов // Трение и износ. — 2010. — Т. 31, № 1. — С. 68–77.

3. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / И. М. Жарский [и др]. — Минск : Высшая школа, 2005. — 299 с.

4. Справочник по химии и технологии твердых горючих ископаемых / А. Н. Чистяков [и др.]. — Санкт-Петербург : Синтез, 1996. — 362 с.

5. A Relation of Hydraulic Conductivity — Void Ratio for Soils Based on Kozeny-Carman Equation / X. Ren [et al.] // Engineering Geology. — 2016. — Vol. 213. — P. 89–97.

6. Tang, T. A Theoretical Model for the Porosity — Permeability Relationship / T. Tang, J. M. McDonough // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 103. — P. 984–996.

7. Макушкин, А. П. Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах / А. П. Макушкин. — Москва : Машиностроение, 1993. — 288 с.

8. Микроскопические исследования деформации растяжения сферолитных структур в полимерных композиционных материалах / Т. А. Охлопкова [и др.] // Вестник СВФУ. — 2015. — № 3 (47). — С. 75–86.

9. Буканова, И. С. Технологическое обеспечение повышенной несущей способности неподвижных соединений типа «корпус — втулка» / И. С. Буканова, Е. Ю. Татаркин, И. И. Ятло // Ползуновский вестник. — 2009. — № 1. — С. 46–50.

10. Хейфец, Л. И. Многофазные процессы в пористых средах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. — Москва : Химия, 1982. — 319 с.

11. Мукутадзе, М. А. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей / М. А. Мукутадзе, А. Н. Гармонина, В. М. Приходько // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017.— № 3 (90) — С. 70–77.

12. Способ формирования покрытий на поверхностях металлических материалов : патент 2240360 Рос. Федерация : C21D10/00, C23C26/00, C23C16/56 / Е. А. Памфилов, П. Г. Пыриков. — № 2003100966/02 : заявл. 13.01.2003 ; опубл. 20.11.2004, Бюл. № 32. — 5 с.

13. Пустовойт, В. Н. Термодинамика, механизм и кинетика фазовых переходов в стали в условиях действия внешнего магнитного поля / В. Н. Пустовойт // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2005. — Т. 5, № 3. — С. 427–447.

14. Pyrikov, P. The tribotechnical properties control of metallic materials by magnetic fields / P. Pyrikov // BALTRIB 2007 : International Conf. 21–23 November. — Kaunas : Lithuanian University oh Agriculture, 2007. — С. 211–217.

Сдана в редакцию 25.04.2019
Принята к публикации 07.05.2019

Об авторах:

Пилюшина Галина Анатольевна,
доцент кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов»
Брянского государственного технического университета (РФ, 241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7),
кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2422-0919
gal-pi2009@yandex.ru

Пыриков Павел Генадьевич,
научный сотрудник лаборатории «Инженерия материалов и адаптивных технологических систем»,
доцент кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов»
Брянского государственного технического университета (РФ, 241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7),
доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2338-7458
pyrikovpg@mail.ru

Памфилов Евгений Анатольевич,
научный сотрудник лаборатории «Инженерия материалов и адаптивных технологических систем»,
зав. кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов»
Брянского государственного технического университета (РФ, 241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7),
доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1522-7246
epamfilov@yandex.ru

Капустин Владимир Васильевич,
научный сотрудник лаборатории «Инженерия материалов и адаптивных технологических систем»,
аспирант кафедры «Триботехническое материаловедение и технологии материалов»
Брянского государственного технического университета (РФ, 241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5207-172
vovakapustin1990@mail.ru